

## **OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL HIDRÓGENO EN UN AMBIENTE SEGURO INSERTO EN ÁMBITO UNIVERSITARIO.**

H. di Prátula<sup>1</sup>, A. Rossi<sup>2</sup>, E. Guillermo<sup>3</sup>, R. Bocero<sup>4</sup>, A. Vitale<sup>5</sup>

Laboratorio de Ingeniería Eléctrica UTN (Universidad Tecnológica Nacional) FRBB (Facultad Regional Bahía Blanca)

**RESUMEN:** El presente trabajo forma parte de un proyecto de análisis de optimización de obtención de hidrógeno mediante energía eólica, y de su almacenamiento y utilización. En este contexto se determinan las condiciones de utilización de una celda de hidrógeno, y se analizan y presentan los procedimientos de seguridad necesarios para el almacenamiento y el uso del gas en la zona de trabajo, con el fin de cumplir con las normas internacionales vigentes y realizar experiencias seguras. Los dos sistemas estudiados son: 1) una celda de hidrógeno conectada a un motor de inducción para evaluar las variables eléctricas y las condiciones de funcionamiento de la misma frente a una carga de tipo industrial, y 2) una celda de hidrógeno conectada a un motor de corriente continua, para su evaluación en condiciones de trabajo dinámico.

**Palabras clave:** seguridad, hidrógeno, celda, optimización, simulación.

### **INTRODUCCION**

Se analizaron las condiciones de funcionamiento de dos celdas de combustible.

En el primer caso, una celda SOFC con un motor de inducción como carga en proceso normal de funcionamiento, incluyendo el arranque. El objetivo fue comprobar el comportamiento de las variables, y el desempeño de la celda frente a las condiciones impuestas por una carga industrial.

En el segundo caso, una celda PEMFC con un motor de CC derivación como carga en proceso normal de funcionamiento, incluyendo el arranque. El objetivo fue comprobar el comportamiento de las variables y el desempeño de la celda frente a condiciones de trabajo dinámico.

#### *Análisis de las Condiciones de Funcionamiento de una Celda de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)*

Se conectó una celda SOFC (SimPowerSystems™), mediante un inversor, a un motor de inducción de 10 HP evaluando las condiciones de funcionamiento en la etapa de arranque y las condiciones estables con una carga de 30 Nwm de par de frenado.

Para realizar las simulaciones (1 s y 5 s) se utilizaron herramientas de Matlab® con los siguientes datos:

#### *Datos del Motor*

Motor de inducción trifásico de 10 HP de potencia y 220 volt, industrial, 1425 rpm con un par de carga de 30 Nwm. Las variables testeadas fueron: tensión y corriente desde el inversor, par, velocidad rotórica y corriente rotórica. El motor alcanzó la velocidad estacionaria en 0.2 s. El comportamiento durante el proceso de arranque fue normal, tanto en relación al par como la corriente. La corriente en el estado estacionario mostró las condiciones normales de alimentación desde un inversor (posee armónicas de baja frecuencia: 3-5-7 etc. y de alta frecuencia (frecuencia de corte del dispositivo)).

La celda se conectó a un inversor IGBT que utiliza control activo de potencia por manipulación de corriente de eje directo y llaveo por histéresis. La potencia es de 50 kW.

Se midieron presión de H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y O<sub>2</sub>, corriente y tensión continuas, y las variables eléctricas a la salida del inversor. El modelo se desarrolló en base a las siguientes condiciones: los gases de la celda son ideales, se definió sólo un valor de presión en el interior de los electrodos, la temperatura de la celda se mantuvo constante en 1273 K, se aplicó la ecuación Nernst's, valor de corriente inicial 100 (A), constante de Faraday 96,487 10<sup>6</sup> (C/mol), potencial ideal 1,18 (V), 450 celdas en serie.

<sup>1</sup> Docente-Investigador GESE UTN FRBB (Grupo Estudios Sobre Energía UTN FRBB)

<sup>2</sup> Docente-Investigador GESE UTN FRBB

<sup>3</sup> Docente-Investigador GESE UTN FRBB

<sup>4</sup> Docente-Investigador GESE UTN FRBB

<sup>5</sup> Becario Posdoctoral CONICET

### *Análisis de las Condiciones de Funcionamiento de una Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEM)*

Se utilizó una celda PEM conectada a un motor de CC en derivación. En las Tablas 1 y 2 se brinda información de las celdas de combustible y datos de sus características, potencias y usos.

Se efectuó una simulación y se midieron: tensión y corriente de la pila y motor, velocidad y par electromagnético del motor, flujo de combustible, utilización % del mismo, eficiencia y consumo de la pila.

Celda de Combustible	Electrolito	Temperatura de operación (°C)	Sustancia contaminante de la celda	Eficiencia eléctrica %
Membrana de intercambio protónico (PEM)	Polímero sólido orgánico	80	S, CO	35-40
Alcalina (AFC)	Hidróxido de Potasio	80-100	CO, CO <sub>2</sub>	< 40
Acido Fosfórico (PAFC)	Acido Fosfórico Líquido	200	S, CO	35-40
Carbonato Fundido	Solución líquida de carbonatos de Litio, Sodio y Potasio	650	S	45-55
Óxido Sólido (SOFC) (Tubular, plana)	Óxido de Zr sólido con adiciones de litio	800-1000	S	45-60

Tabla 1: Tabla Comparativa de Celdas de Combustible (Gómez Figueroa, 2007)

Usos	Potencia	Tipo Celda	Combustible	Denominación
Portátiles (problemas técnicos)	1-50 (W)	PEMF DMFC, IT-SOFC	H <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> OH	Membrana de intercambio de protones Metanol directo – óxido sólido
Micro-CHP (problemas técnicos)	1-10 (KW)	PEMFC- IT-SOFC	CH <sub>4</sub>	Membrana de intercambio de protones – óxido sólido
APU, UPS motos (problemas técnicos)	1-10 (KW)	IT-SOFC	Gasolina – Gases licuados	Óxido sólido
CHP inmuebles (abaratar costos)	50-250 (KW)	PEMF, SOFC, MCFC	CH <sub>4</sub>	Memb. de Interc. de protones Óxido sólido – carbonato fundido
Autobuses urban. (abaratar costos)	200 (KW)	PEMFC	H <sub>2</sub>	Memb de interc de protones
Centrales Eléctricas (abaratar costos)	1 a 10 (MW)	SOFC	CH <sub>4</sub>	Óxido sólido

Tabla 2: Aplicaciones de las Pilas de Combustible (R.S.Merino, Investigación del ICMA)

Dada la importancia para las aplicaciones industriales de la variación de tensión, este valor fue testeado en la simulación (Figura 1).

#### *Simulación: Modelos*

Los modelos utilizados en las simulaciones se observan en las Figs. 2 y 3

#### *Seguridad en el Lugar de Trabajo*

El sistema documental fue elaborado en el marco del Proyecto de Investigación OPTIMIZACIÓN INTEGRAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES CON EL VECTOR HIDRÓGENO, con el objetivo de aportar datos sobre las normas de seguridad en una instalación de hidrógeno gaseoso comprimido, procedimientos para la manipulación de equipos que usen hidrógeno gaseoso comprimido, y procedimientos para el transporte y puesta en servicio de los envases contenedores en relación a la instalación de un equipo modelo Nexa™ Power Module compuesto por una batería de celdas de hidrógeno construidas con tecnología PEM, que genera 1,2 kW de potencia en corriente continua, provisto de software y manual de uso, e interfaces necesarias para el control electrónico y de combustible.

El lugar de instalación del equipo (primer piso en un edificio de cinco) se observa en la Figura 4.

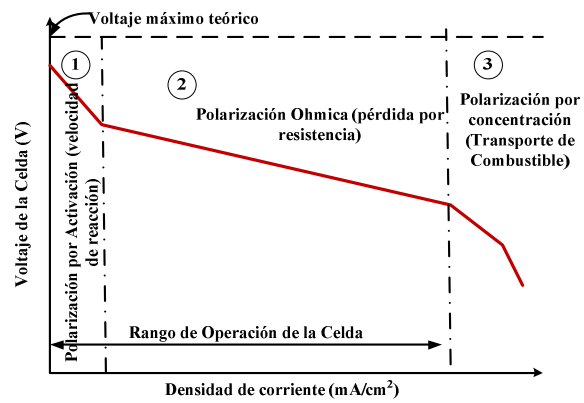


Figura 1: Eficiencia de la celda de combustible.

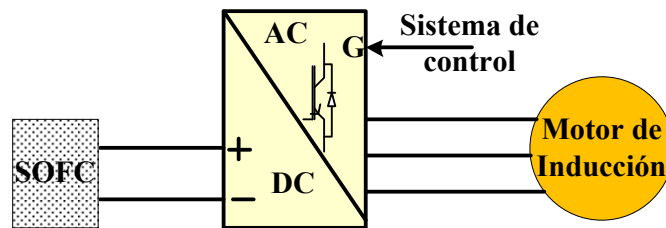


Figura 2: Modelo utilizado para la simulación de una celda SOFC conectada a un motor de inducción (Matlab®).

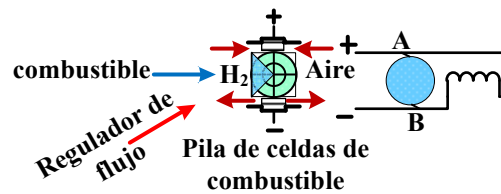


Figura 3: Modelo utilizado para la simulación de una celda PEM FC conectada a un motor de CC derivación (Matlab®).

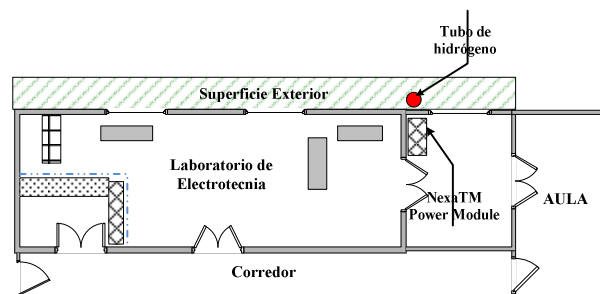


Figura 4: Ubicación del equipo de Hidrógeno

La instalación del equipo y accesorios se muestra en las Figuras 5, 6, 7 y 8.



Figura 5: Tubo de gas y conexión.



Figura 6: Equipo Nexa™ Power Module.



Figura 7: Sensor de escape de hidrógeno.

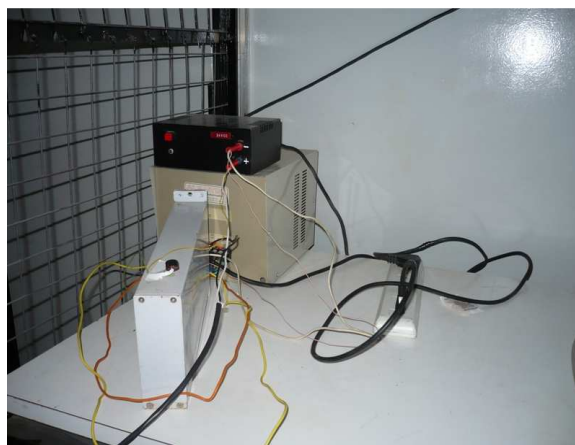


Figura 8: Interface sensor de escape de hidrógeno.

## RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

### *Primera simulación: Celda SOFC con carga de un motor de inducción*

Se efectuó la simulación utilizando el modelo presentado en la Figura 2. Se realizaron dos simulaciones con tiempos diferentes, de 1 segundo y 5 segundos. El objetivo fue determinar el comportamiento de la presión del  $O_2$ ,  $H_2$  y  $H_2O$  en el tiempo (Figura 9). Al mismo tiempo pudo evaluarse el comportamiento de las variables eléctricas en relación a la máquina de inducción.

Se observó crecimiento del requerimiento de  $H_2$  con disminución del  $H_2O$ , mientras que el comportamiento del  $O_2$  difirió en la magnitud (mayor). El comportamiento del motor de inducción mostró un proceso normal tanto en arranque como en estado estacionario.

### *Segunda simulación: Celda PEM FC con carga de un motor de corriente continua en derivación*

Se efectuó la simulación utilizando el modelo presentado en la Figura 3. El objetivo fue determinar el comportamiento del flujo de combustible, consumo y eficiencia. Al mismo tiempo se evaluó el comportamiento de las variables eléctricas en relación a la máquina de corriente continua.

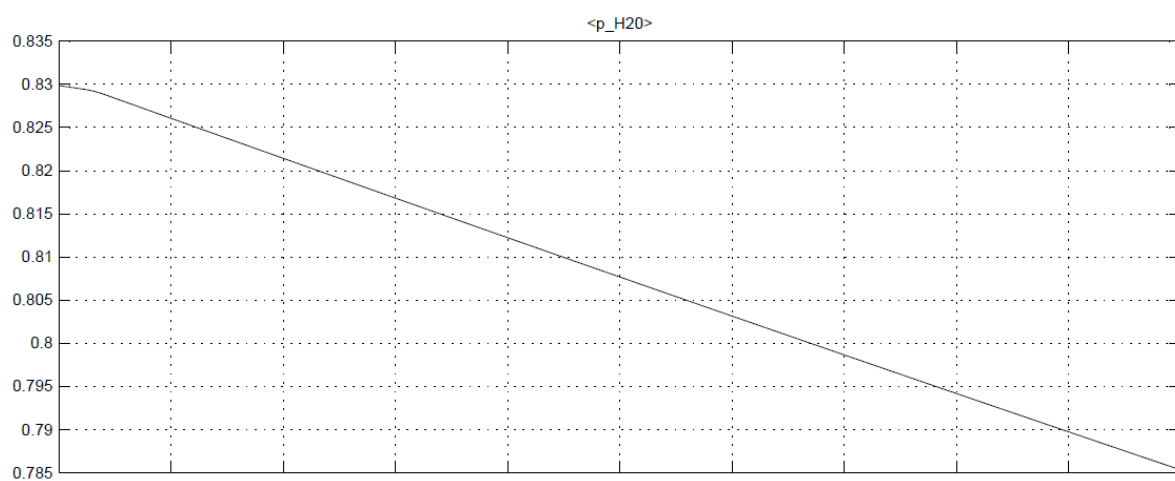
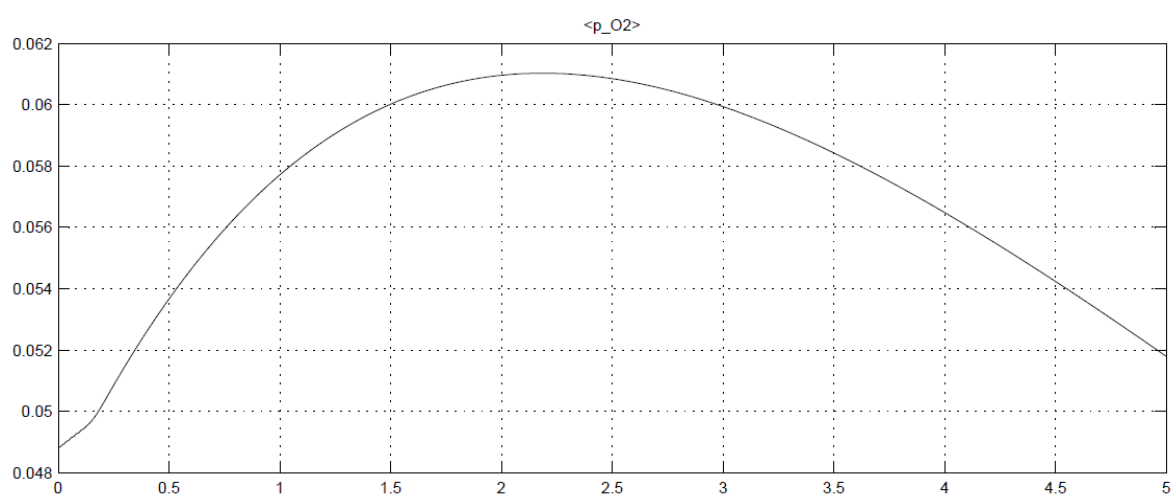
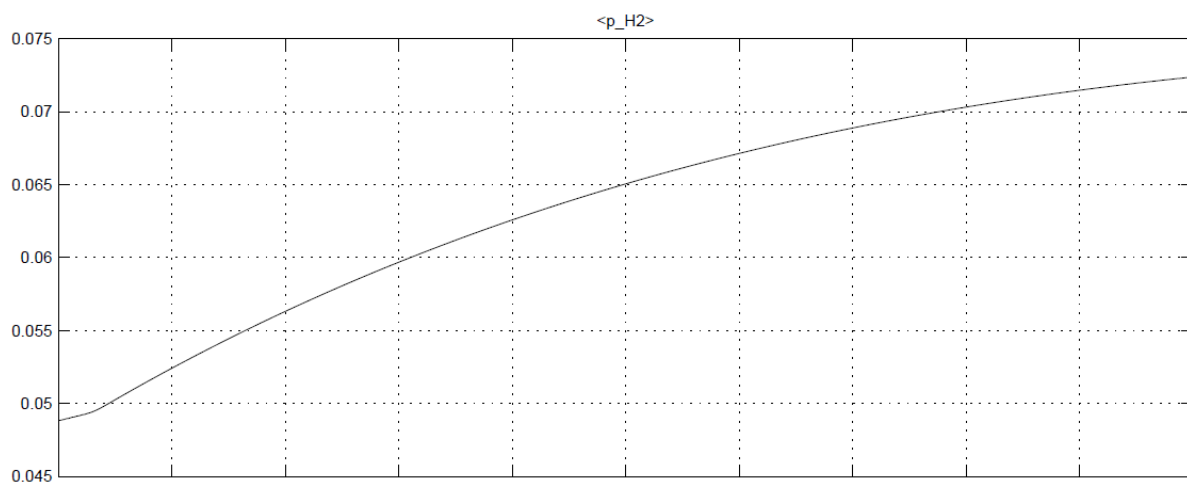


Figura 9: Variables importantes de la Celda:  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$

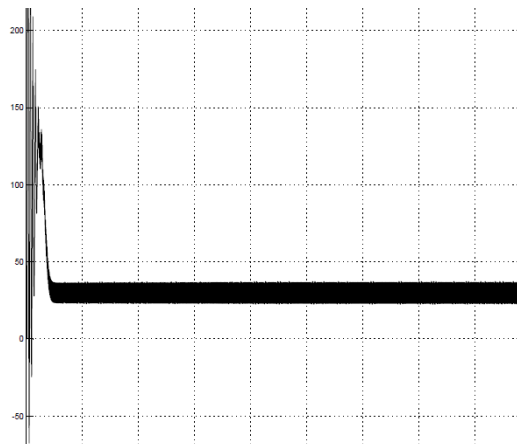


Figura 10: Par electromagnético del motor

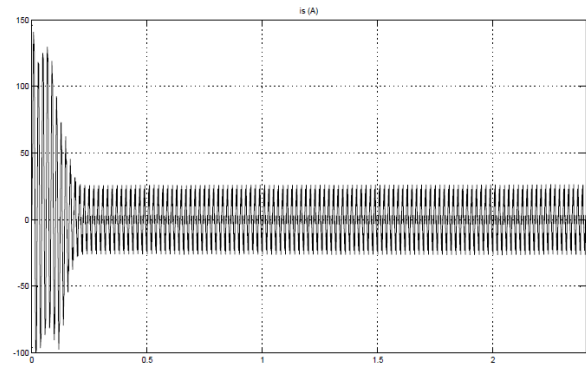


Figura 11: Corriente estática del motor de inducción

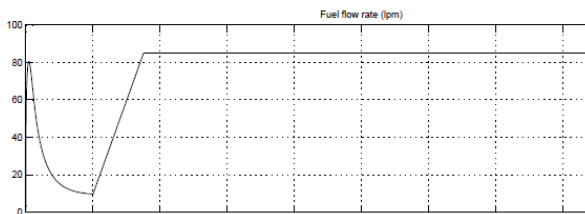


Figura 12: Flujo de combustible

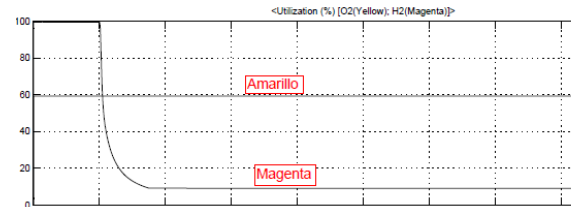


Figura 13: Utilización %

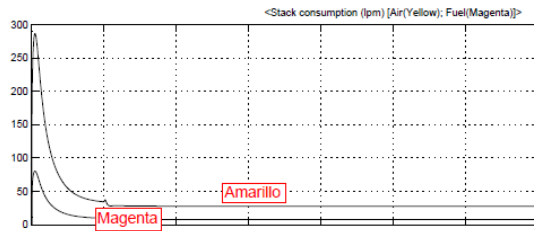


Figura 14: Consumo de la pila

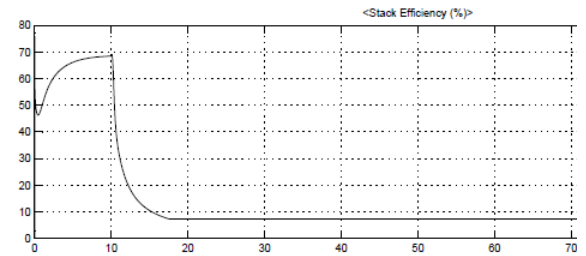


Figura 15: Eficiencia de la pila

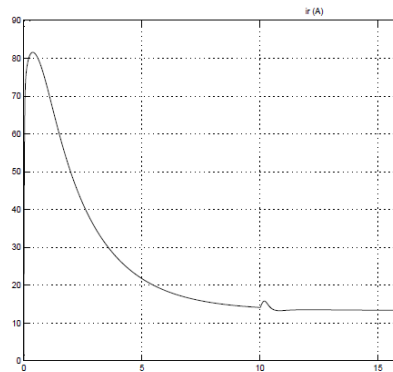


Figura 16: Corriente del motor

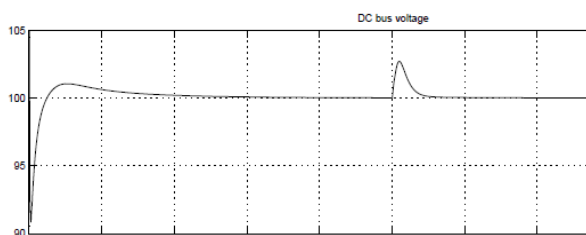


Figura 17a: Voltaje estático del motor

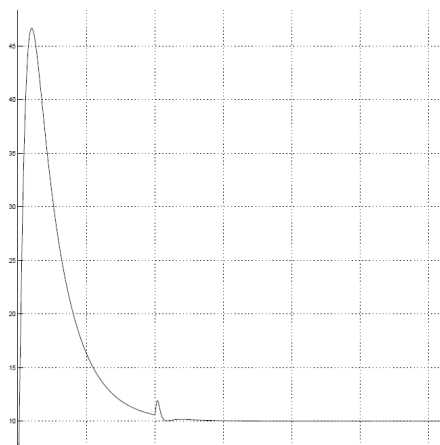


Figura 17b: Par electromagnético del motor

El comportamiento de la pila de celdas de combustible mostró que la influencia del proceso inicial de arranque del motor de CC se da en mayor medida en la eficiencia de la pila. El comportamiento del motor, tanto desde el punto de vista eléctrico como del par electromagnético, puede considerarse normal en relación a la fuente de provisión de energía.

### ANÁLISIS DE LAS NORMAS DE SEGURIDAD

En el año 1988 se iniciaron, a través de la Organización Internacional de Estandarización (ISO) en Suiza, los procesos para intentar normalizar, a nivel internacional, las actividades de producción, distribución y uso del hidrógeno.

El crecimiento de las nuevas tecnologías del hidrógeno, la economía del hidrógeno y su empleo como transportador energético han puesto el centro de atención en el futuro usuario, que generalmente ha de ser el hombre común, y no un especializado operario o profesional de la industria química. Es por ello que en el mundo entero se han venido desarrollando estándares y la Argentina ha participado a través de las normas IRAM.

El Comité Técnico ISO/TC 197, trabaja con el objeto de desarrollar normas en el campo de los sistemas y dispositivos de producción, almacenaje, transporte, medida y uso del hidrógeno. Mundialmente este comité, denominado tecnologías del Hidrógeno, es reconocido como una entidad prominente y responsable en el desarrollo de normas, códigos y guías generales en el campo de las tecnologías del hidrógeno.

Las actividades de estandarización en las Argentina fueron promovidas por la Asociación Argentina del Hidrógeno. Esta Asociación y el IRAM, formaron el Comité Nacional ISO/TC 197, a fin de ingresar en las discusiones específicas y participar en las definiciones en lo relativo al uso del hidrógeno en todos y cada uno de sus estados y formas.

Se mencionan las siguientes normas publicadas:

ISO/IS 13984: Interfase para la alimentación con hidrógeno líquido de vehículos terrestres, publicada por ISO hacia fines de 1999 bajo el título: Liquid hydrogen Land vehicle fuelling system interfase.

ISO 14687:1999/cor.1:2001 denominada Hydrogen fuel Product specification, que cubre las especificaciones de producto para el hidrógeno en todas sus calidades y usos. De este último estándar se cuenta con la versión en español de IRAM denominada IRAM/ISO 14687

ISO/TR 15916:2004 Basic considerations for the safety of hydrogen system, publicada el 11 de febrero de 2004. Teniendo en cuenta los aspectos de seguridad se constituyó un grupo especial de trabajo denominado Grupo N° 7 (WG7), con el objeto de desarrollar un documento que incluyera todos los aspectos básicos relacionados con la seguridad del hidrógeno. El documento ISO finalmente publicado en 2004 lleva el título: ISO/TR 15916:2004 Consideraciones Básicas para la Seguridad de los Sistemas de Hidrógeno. Este informe técnico (TR) proporciona guías para el uso seguro del hidrógeno en sus formas gaseosa y líquida e identifica las preocupaciones básicas y riesgos asociados con el uso del hidrógeno, describiendo además las propiedades del hidrógeno que son relevantes para la seguridad.

#### *Equipo Instalado en la Universidad*

La celda funciona con hidrógeno puro y seco. El subsistema de abastecimiento de combustible comprende los siguientes elementos: un transductor de presión para monitorear las condiciones de entrega de hidrógeno a la celda, una válvula de venteo para proteger a los componentes de la celda ante sobre presiones, una válvula a solenoide para otorgar aislamiento con la fuente de alimentación de hidrógeno durante el apagado de la celda, un regulador de presión para mantener la presión de abastecimiento dentro de los límites de funcionamiento de la celda y un detector de escapes de hidrógeno para controlar los niveles en la cercanía del subsistema de abastecimiento del combustible.

La celda contiene hidrógeno presurizado durante su funcionamiento. El sistema de regulación entrega continuamente hidrógeno para ser consumido durante la reacción en la celda. El nitrógeno y el agua producida en la circulación de la corriente de aire, migra lentamente a través de la membrana de la celda y se acumula gradualmente en la circulación del hidrógeno.

La acumulación de nitrógeno y agua en el ánodo (hidrógeno), provoca una disminución en un parámetro de la celda denominado “purgado de la celda”. Respondiendo al voltaje de purgado de la celda, una válvula de purgue de hidrógeno ubicada en la salida de la batería de celdas, se abre periódicamente para despedir los constituyentes del ánodo y restaurar la performance de la celda. Sólo una cantidad pequeña de hidrógeno se purga del sistema, menor al 1% del hidrógeno consumido.

Para dotar de seguridad al recinto de instalación del equipo teniendo en cuenta su utilización en lugares cerrados (casas o edificios), se implementó con un instrumento Freedom™ 5000 (Scott Healt & Safety, 2007) un sistema de alarma que mediante un sensor de presencia de hidrógeno (instrumento ubicado en la corriente de aire de salida), permite controlar que no se alcancen los límites de inflamabilidad (Gonnet et al., 2011).

La celda de combustible está diseñada para operar con hidrógeno gaseoso puro. El combustible no necesita ser humedecido. El hidrógeno puede abastecerse dentro de un rango de presión que va desde los 70 a 1720 KPa(g), (10 a 250 psig). Existe una válvula de escape de presión inmediatamente después del regulador en el sistema de abastecimiento de hidrógeno. La válvula de escape ventea a los 2400 KPa(g) (350 psig), para asegurar que no existan condiciones de sobrepresión a la salida del regulador del sistema de abastecimiento de combustible. La válvula de escape ventea en las cercanías de un detector de pico de hidrógeno instalado en la plaqueta de la celda y produce un apagado del sistema si detecta un excesivo valor de presión de abastecimiento de hidrógeno.

### *Procedimiento de Seguridad*

Se elaboró un Manual de Procedimientos de Seguridad (como parte del sistema documental completo), compuesto de diez documentos listados en la Tabla 3.

Código	Versión	Título	Código Anexos	Título de Anexos
PS-001	0	Medidas preventivas para la manipulación de hidrógeno		
			PSA-001-01	Preguntas y respuestas
PS-002	0	Manipulación de botellas de gases comprimidos y criogénicos, e hidrógeno.		
PS-003	0	Tratamiento de emergencias ocasionadas con hidrógeno		
	0		PSA-003-01	Registro de Accidentes / Incidentes / Tratamiento de la emergencia
PS-004	0	Uso seguro del equipo Nexa™ Power Module		
PS-005	0	Acceso restringido para uso del equipo Nexa™ Power Module		
	0		PSA-005-01	Planilla para listado de personal autorizado
	0		PSA-005-02	Acta de recepción de llave
	0		PSA-005-03	Acta de devolución de llave

Tabla 3: Procedimientos de Seguridad (PS)

El alcance de los documentos listados (es decir, el personal que debe utilizarlos) es:

- Personal afectado al uso del equipo Nexa™ Power Module y al manejo y manipulación de tubos de hidrógeno, Visitante o que se encuentre trabajando en dónde se almacene o manipule hidrógeno en cualquiera de sus formas.

El Manual de Procedimientos de Seguridad se confeccionó con el objetivo de:

- ✓ Informar acerca de los riesgos generales originados por la manipulación de hidrógeno. Establecer medidas preventivas, de carácter general, para la realización de tareas que involucren directa o indirectamente la manipulación de hidrógeno, con el fin de evitar situaciones de riesgo, que resulten en incidentes y/o accidentes.
- ✓ Establecer las acciones a llevar a cabo para la manipulación y almacenamiento de botellas de gases comprimidos y criogénicos, e hidrógeno.
- ✓ Establecer las acciones a llevar a cabo ante una situación de emergencia, incidente o accidente, ocasionada por escapes o contacto con hidrógeno.
- ✓ Establecer los lineamientos para limitar el uso del equipo Nexa™ Power Module sólo a personal autorizado.

*Resumen de Riesgos Posibles con Gas Hidrógeno* (Departamento de Salud y Servicios Para Personas Mayores de New Jersey, 2002)

Dadas las condiciones del hidrógeno, se afirma generalmente que el hidrógeno es auto-ignicionante. Esto obliga a que los recipientes de metal usados en el traslado del hidrógeno deban estar conectados a tierra y unos a otros, y los tubos o cilindros de almacenamiento deben estar equipados con válvulas de cierre automático, tapas para vacío de presión y mata llama.

En caso de fuga e incendio, debido a la casi invisibilidad de la llama del hidrógeno a la luz del día y a su bajo nivel de radiación térmica, existe el riesgo de ingresar inadvertidamente a una zona incendiada. Por eso se recomienda llevar por delante extendida una escoba e ir tirando puñados de desperdicios o basuras, mientras se avanza lentamente, para localizar el extremo del fuego, y detener la fuga.



Los cilindros de almacenamiento de gas hidrógeno (Figura 18) se identifican convencionalmente con color rojo bermellón la ojiva o parte superior del cilindro. Llevan una franja con las marcas del fabricante, nombre del gas con todas sus letras, número de fabricación, capacidad de agua (en litros), presión de prueba hidrostática en kg/cm<sup>2</sup> (mes y año), peso en vacío y presión de carga a 15° en kg/cm<sup>2</sup>. También llevan el símbolo de seguridad de la Figura 19.



Figura 18: Componentes y etiquetado de un cilindro de gas hidrógeno



Figura 19: Símbolo de seguridad de gas hidrógeno.

Debido a los cuidados que requiere la utilización de equipos y cilindros de gas hidrógeno, se hace necesario restringir el acceso a los mismos sólo a personal autorizado. El procedimiento PS-005 fue elaborado con dicho fin, y establece:

“que toda persona a ser autorizada al uso del del equipo Nexa™ Power Module, deberá proceder a la completa lectura de toda la documentación perteneciente al Sistema de Gestión para Uso Seguro del Equipo Nexa™ Power Module, quedando registrados su nombre completo, función, firma y fecha de alta, en la “Planilla para listado de personal autorizado” (identificado como PSA-005-01 en la Tabla 3.

## CONCLUSIONES

Las simulaciones efectuadas sobre una celda SOFC y PEM con motores en condiciones dinámicas (arranque) y estacionarias de uso industrial muestran que una pila de combustibles puede abastecer dicho tipo de carga. El comportamiento de las variables eléctricas fue el esperado tanto en corriente alterna trifásica (motor de inducción) como en corriente continua (motor de CC con campo en derivación). El comportamiento de las celdas mostró variaciones importantes durante el proceso de arranque con estabilidad esperada durante el periodo estacionario. Las simulaciones realizadas permiten analizar aspectos relacionados al modelo utilizado y establecer un marco de referencia para las futuras simulaciones experimentales con la celda existente. Para la simulación experimental se utilizó un motor de CC de potencia adecuada a la potencia del equipo a ensayar.

La implementación del sistema documental en el ámbito universitario mostró como dificultad inicial la readaptación del espacio físico para garantizar mejor el uso seguro del equipo instalado. Se destaca la importancia de concientizar a los destinatarios de la importancia de usar los protocolos, y de esta manera conseguir trabajar en un marco de seguridad aceptable.

## REFERENCIAS

- Ballard Power Systems (2003). Inc Nexa™ Power Module User's Manual.
- Departamento de Salud y Servicios Para Personas Mayores de New Jersey (2002). Hoja Informativa Sobre Sustancias Peligrosas, <http://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1010sp.pdf>. Fecha de consulta: Setiembre 2011.
- Gómez Figueroa, A. (2007). Generación de Energía con Celdas de Combustible en Combinación con Turbinas de Gas y sus Posibilidades de Implementación en Unidades Navales. XX Congreso Panamericano de Engenharia Naval, Transporte Marítimo e Engenharia Portuaria, São Paulo, Brasil.
- Gonnet A., Robles S. y Moro L. (2011). Estudio y Resultados Experimentales de la Eficiencia en la Producción de Energía Eléctrica con una Celda de Combustible PEM. Cuarto Congreso Nacional y Tercer Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía HYFUSEN 2011, 6 al 9 de junio de 2011, Mar del Plata, Argentina.
- Merino R. (2006). Nuevos Materiales Para Pilas de Combustible. Proyecto Aragón Investiga. Departamento de Ciencia, Tecnología y Universidad del Gobierno de Aragón. <http://www.aragoninvestiga.org/Nuevos-materiales-para-pilas-de-combustible/>. Fecha de consulta: Setiembre 2011.
- Municipio de Pico Truncado (2006). Estudio de Impacto Ambiental. Planta Modelo de Producción de Hidrógeno: III Descripción del Proyecto e Impactos.
- Scott Health & Safety (2007). Freedom™5000, Universal Analog Toxic Gas Transmitter, Operation and Maintenance Manual. [http://www.scottsafety.com/en/us/DocumentandMedia1/Engineering/UserManuals/UserManuals/087-0020\\_C.pdf](http://www.scottsafety.com/en/us/DocumentandMedia1/Engineering/UserManuals/UserManuals/087-0020_C.pdf). Fecha de consulta: Setiembre 2011.
- Universidad de Alicante (2005). Instrucción IPRL-08: Manipulación de Gases y Líquidos Criogénicos. <http://m.sp.ua.es/es/gestion-de-la-prevencion/manual-de-procedimientos/instrucciones.html>. Fecha de consulta: Setiembre 2011.